

УДК 621.91

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина,
В.М. Кучеровский, канд.техн. наук, А.М. Барак, Москва, Россия,
А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина,
С.Г. Серебренникова, Москва, Россия

ВОЛНЫ И ТЕХНОГЕННАЯ ДИЛАТАНТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ СТРУКТУР

Всі уявлення про зміну фізичного стану - пористості, рідинно-газової проникності масиву монолітних скельних порід та видобутку корисної копалини, пов'язані з подрібненням та тріщиноутворенням гірських порід. Цей процес потребує великих енергетичних та фінансових витрат. Альтернативою цьому процесу є дилатантне розуцільнення масиву. Дилатансія являє собою зсув по кристалічним площинам. Це можуть бути площини окремих кристалів або цілих блоків. Зсув по суцільному об'єкту, дією суперпозиції імпульсних хвиль при нерівномірному навантаженні забезпечує рівномірну проникність суцільного масиву за рахунок новоутвореної тріщинності та пористості масиву. Разова суперпозиція нерівномірного хвильового поля та багаточисельно імпульсно хвильова активація дислокацій приводить до прискорення дифузії і послідовному підвищенню видобутку корисної копалини. Багаточислове імпульсно хвильове навантаження з заданим вектором швидкості часток в хвилі і наявності рідкої фази приводять до дилатантних ефектів при значно менших значеннях напруженості в масиві.

Все представления об изменении физического состояния, в том числе пористости, жидкостно-газовой проницаемости массива монолитных скальных пород и извлекаемости полезного ископаемого связываются с дроблением или трещинообразованием горных пород. Процесс этот энергоемкий и затратный. Альтернативой ему является дилатантное разуплотнение массива. Дилатансия представляет собой сдвиг по кристаллическим плоскостям. Это могут быть плоскости отдельных кристаллов или целых блоков. Сдвиг по всему объему, подтвержденному суперпозицией импульсных волн неравномерному нагружению обеспечивает равномерную проницаемость всего массива за счет вновь образованной трещиноватости и пористости массива. Разовая суперпозиция неравномерного волнового поля и многоцикловая импульсно-волновая активация дислокаций приводит к ускорению диффузии и последующему повышению извлекаемости полезного ископаемого. Многоцикловое импульсно- волновое нагружение с заданным вектором скорости частиц в волне и наличии жидкой фазы приводит к дилатантным эффектам при значительно меньших величинах напряжений в массиве.

All current understanding of methods used in order to establish production of deeply deposited mineral resources from non-permeable and crystalline rocks so to achieve or improve extraction of such resources through wells is associated with destruction and fracturing of such rocks. Known methods of such destruction and fracturing are expensive and require lots of energy. De-latent decompression of rock masses might be viewed as a more usable and inexpensive alternative to such methods. De-latency may be described as a multiple shift within a rock mass along inter-crystal surfaces. These could be surfaces between micro crystals as long as otherwise surfaces of high stress within the rock mass. Volumetric shifts within the mass instigated with superposition of impulse waves and enhanced with unequal stress within the mass provides for establishing volumetric permeability through newly formed micro fractures connecting natural pores of the rock mass. Mono-impulse wave superposition as well as multi-cyclical wave activation leads to enhancement of diffusion processes and in turn to improvement of extraction of such natural resource. Multi-cyclical and calculated impulse wave enhanced technogenous and volumetric stress with controlled vector of the load and controlled parameters of the waves

leads to the de-latent effect, and therefore, establish new permeability and controlled flow within formation.

До настоящего времени все представления об изменении физического состояния, в том числе пористости, жидкостно - газовой проницаемости массива монолитных скальных пород и извлекаемости полезного ископаемого связывались с дроблением или с трещинообразованием горных пород.

Например, для технологических целей извлечения полезного ископаемого методами геотехнологии непроницаемые скальные породы можно подготовить несколькими путями.

Первый, традиционный путь, который в настоящее время повсеместно применяется в технологической практике – это отбойка и дробление руды на свободную поверхность с последующим орошением отбитой горной массы растворителем и откачкой раствора при выщелачивании полезного ископаемого. Для полного извлечения полезного ископаемого в этом случае кусок должен иметь размер 20-60 мм, (но не более 100 мм).

Второй путь – не дробить массив, а образовать в нем достаточно густую сетку микротрещин, например, при помощи взрыва. При камуфлетном взрыве образуется сетка трещин в ближней от взрыва зоне (в радиусе 1-2м для скважин диаметром 70-100 мм), которая делит массив на отдельные еще более крупные и неравномерные, чем те, которые получаются при дроблении массива.

Трещинообразование происходит только в ближней зоне (1-2м), так как оно возможно только при очень больших напряжениях и в энергетическом отношении по этой причине весьма нецелесообразно (экономнее в энергетическом отношении отбивать и дробить массив на свободную поверхность). Имеются результаты исследований явления *дилатансии** в горных породах под действием одноразового взрывного воздействия, при которых обнаружено увеличение проницаемости массива в ближней от взрыва зоне (на расстоянии 10-15 радиусов заряда), вызванное трещинообразованием [1].

Имеются результаты исследования явления капиллярного эффекта [2], суть которого сводится к увеличению массопереноса через пористые структуры под действием ультразвуковых полей, т.е. знакопеременных волновых полей звуковой амплитуды.

Получены результаты исследований вибрационного воздействия на нефтеносные пласты для повышения их нефтеотдачи, сущность которых состоит в прерывистой подаче с помощью специальных устройств вытесняющей жидкости, т.е. созданию в ней пульсаций давления. Пульсация давления создавалась в пределах от звуковых амплитуд до амплитуд величиной 20-30 МПа, причем колебания носили хаотический характер, т.е. целенаправленно не использовалась скорость волнового движения жидкости. Кроме того, амплитуды давлений имели недостаточную величину для эффективного воздействия на скальные породы. Тем не менее, результаты были получены положи-

29

тельные: эффективность увеличивается на 10-15%, а его продолжительность в 3 раза меньше продолжительности вытеснения нефти без вибрации. Объясняется это тем, что речь во всех случаях шла об уже проницаемых структурах, а вибрации лишь ускорили массоперенос нефти.

Несмотря на перечисленные особенности вибрационного воздействия, на нефтеносные пласты, элементы рассматриваемого эффекта частично могли сказаться на конечных результатах экспериментов. Описанный эффект определяет новый путь управления физико-механическими свойствами горных пород на месте залегания, прежде всего для обеспечения проницаемости массива без его дробления и расчленения трещинами. В его основе лежат явления дилатантного разуплотнения и усталостных эффектов в массиве, происходящих в присутствии жидкой фазы в условиях, как разового высокоамплитудного, так и многоциклового низкоамплитудного неравномерного нагружения массива направленными импульсными волнами, при которых возникают сдвиговые напряжения и давления усталостного характера, сопровождающиеся перемещением и накоплением дефектов кристаллической структуры, порождающими пористость массива.

Дилатансия представляет собой сдвиг массива по кристаллическим плоскостям. Это могут быть плоскости отдельных кристаллов или целых блоков. Сдвиг по всему объему, подтвержденному суперпозицией импульсных волн неравномерному нагружению, а также накопление усталостных явлений при многоцикловогом низкоамплитудном нагружении, обеспечивают равномерную проницаемость всего массива за счет вновь образованной трещиноватости и

пористости массива. Разовая суперпозиция неравномерного волнового поля и многоциклового импульсно-волнового активация дислокаций приводят к ускорению диффузии и последующему повышению извлекаемости полезного ископаемого. Многоциклового импульсно - волнового нагружение с заданным вектором скорости частиц в волне и при наличии жидкой фазы приводит к дилатантным эффектам при значительно меньших величинах напряжений в массиве. Наиболее эффективное дилатантное разуплотнение происходит при создании в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений, в то время, как в остальных двух плоскостях нагружения имеют место сжимающие напряжения.

Например, в монолитном граните при такой схеме нагружения дилатантное разуплотнение возможно при величине сжимающих напряжений, равных 5,0 МПа [2], в то время как для трещинообразования в сплошном массиве гранита необходимы напряжения 300-500 МПа вблизи свободной поверхности, а на больших глубинах, где скапливается горное давление, в массиве вообще невозможно создать трещины сжимающими напряжениями, если он со всех сторон сжат высокими давлениями.

При импульсно-волновом циклическом увеличении давления поровой жидкости с направлением вектора скорости частиц в волне внутрь массива вдоль напластования горных пород, прочность горных пород резко уменьшается и явления дилатансии в граните возможны при давлениях порядка 1 МПа за счет появления предельной неравномерности нагружения массива в микрообъемах из-за различных величин давлений поровой жидкости в порах различных размеров, расположенных под разными углами к направлению вектора скорости частиц в волне.

Кроме того, участки массива, охваченные импульсной волной, по мере удаления волны от зоны излучения, приобретают все большее поперечное сечение и, соответственно, все меньшее значение амплитуды напряжений не сохраняют постоянную позиционную картину нагруженности массива, а именно, за участком массива, охваченным волной сжатия в плотную следует участок с растягивающими напряжениями, что обуславливает условия для реализации дилатантного разуплотнения массива.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что дилатантное разуплотнение в условиях эффектов многоциклового нагружения возможно на расстояниях, в 10-20 (до 100) раз превышающих зону трещиноватости от эпицентра взрыва, так, как для его возникновения нужны напряжения, во много раз меньше по величине. Это вносит принципиально новые представления в науку о добыче полезных ископаемых и о глобальных геопроцессах, которые могут происходить в природных условиях.

Например, расширение добычи полезных ископаемых методами геотехнологии на скальные породы, в том числе монолитные скальные породы без их дробления, позволяет пересмотреть сложившиеся требования к кондиции руд и увеличить их промышленные запасы. Как показали исследования, резко увеличивается извлечение металла с применением описываемых эффектов.

Широкое промышленное применение описываемого явления позволяет решить проблему повышения извлекаемости нефти и газа, а также дегазации угольных массивов с целью исключения выбросов газа при добыче угля.

Физическую сущность эффекта объясняют следующие изученные научкой явления.

Дилатантные деформации участка массива, охваченного волной, приводят к пористости массива. С дилатантными деформациями связано некоторое увеличение объема массива, что обычно приводит к остаточным деформациям.

Для обеспечения сдвиговых деформаций необходимо обеспечить неравномерность нагружения массива. Наиболее эффективное дилатантное разуплотнение происходит при создании в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений. В то время, как в остальных двух плоскостях нагружения имеют место напряжения.

31

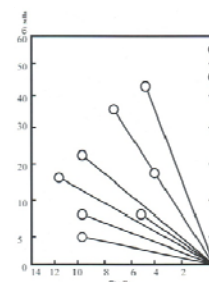


Рисунок 1 – Графические пути нагружения до разрушения (кружки) образцов гранита (начальная пористость 2,64 г/см³)
 σ_1 - максимальное сжимающее напряжение
 σ_2 - максимальное растягивающее напряжение

На рис. 1 приведены графические зависимости, иллюстрирующие возможности разрушения гранита в условиях неравномерных деформаций [2].

Из графиков видно, что разрушение, трещино- и поробразование можно осуществить при значениях напряжений сжатия в пределах 1-10 МПа при наличии в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений.

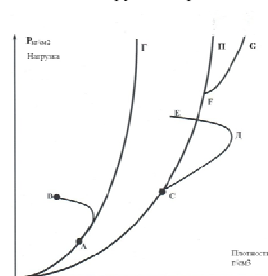


Рисунок 2 – Характерные кривые статического сжатия горных пород:
 ОГ- для монолитной горной породы; ОП- для пористой горной породы;
 Р - давление сжатия, кг/см²; ρ_0 , ρ - плотность массива, г/см³.

На рис. 2 приведены характерные кривые сжатия горных пород в условиях неравномерного нагружения [1].

Если сжать образец гранита вдоль ОА, а затем приложить сдвиговое усилие, то вначале сжатие будет происходить и дальше вдоль кривой ОГ, а

32

затем перейдет в состояние В, несмотря на повышенное давление, т.е. произойдет разуплотнение массива в условиях высоких давлений.

Аналогичное сдвиговое нагружение песчаника вначале приводит к его сжатию (от С к Д), а затем происходит дилатантное разуплотнение (от Д к Е).

Однако в пористых породах, в особенности осадочных при больших давлениях дилатантное разуплотнение не только отсутствует, но и происходит уплотнение массива. Это свидетельствует о строго дифференцированном выборе амплитуд давлений (напряжений) воздействия на массив с целью получения его дилатантного разуплотнения. При несоблюдении этого условия можно получить обратный эффект – снижение проницаемости массива. Исходя из этих соображений, трудно управляемые по величине нагружения взрывные воздействия на массив осадочных пород с целью обеспечения его проницаемости менее предпочтительны в сравнении с методом силовых волн от отдельного генератора. Кроме этого, взрывом трудно практически обеспечить многоцикловый характер нагружения массива и направленное излучение волн с необходимым направлением вектора скорости частиц в волне по отношению к поверхности напластования на каждой глубине залегания горных пород.

Если считать, что справедлив критерий критической энергии деформации по Гриффитсу, то отмеченная выше единственность в поведении горных пород предполагает единственность деформаций при заданных среднем давлении и сдвиговом напряжении. Эта гипотеза была проверена на хрупких горных породах. На ее основе построено определяющее соотношение, которое представляет дилатантную деформацию в виде:

$$\varepsilon_d = \exp \left[\frac{\Delta P}{P_0} - A(t) \right]$$

где: $\varepsilon_d = \frac{\Delta V}{V}$ – относительное изменение деформируемого объема (например, охваченного волной);

ΔP – дилатансионное приращение объема, м³;

P_0 – начальный объем, подвергаемый деформации, м³;

dP – приращение среднего давления, МПа;

$A(t)$ – сдвиговое напряжение МПа;

χ, A – функции, зависящие от деформируемого материала.

Дилатантное увеличение объема описывается экспоненциальным законом.

Такая форма записи проста и описывает поведение горных пород через экспериментально измеримые параметры

Инновационный вектор в технологии добычи полезных ископаемых в этом случае направлен на их скважинную добычу, путем перевода их в раствор на месте залегания, что снижает себестоимость добычи редких, радиоактивных, цветных и драгоценных металлов в 3-5 раз.

Список использованных источников: 1. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев. Наукова думка. 1980, с 154. 2. Ржевский В.В. Бажал А.И. и др. Изменение свойств горных пород в массиве импульсно-волновыми полями при подземном выщелачивании руд. М. Цветметинформация. Выпуск 2, 1985, с.55.

Поступила в редколлегию 12.03.2012